

Chapitre I : généralités sur les barrages

I-Introduction :

I-1-Définition d'un barrage :

Les barrages, ouvrages hydrauliques édifiés au travers d'une vallée, ont pour objet de retenir, en les accumulant en hauteur, les eaux d'une rivière. Leur objectif primitif et qui demeure toujours essentiel est l'irrigation. Ils peuvent également être utilisés en tant que régulateurs de crues, à des fins énergétiques (production d'énergie hydroélectrique) ou pour l'alimentation en eau potable. Ces différentes fonctions sont souvent associées afin de valoriser un même barrage. Mais, dans la gestion du stock de l'eau, une prépondérance est toujours donnée à l'une d'entre elles. D'autres utilisations, bien que secondaires, sont également à mentionner : usages industriels (rétention d'effluents boueux), navigation, création de polders, de plans d'eau...

Les barrages comptent parmi les constructions humaines les plus anciennes. Leur développement actuel coïncide avec les évolutions démographique et économique, qui imposent, dans la plupart des régions du globe, la construction de réservoirs de plus en plus grands, tant en hauteur qu'en longueur, afin d'assurer de manière continue et régulière les besoins en eau et en énergie des populations, des cultures et des industries.

Globalement, les autres objectifs des barrages sont mineurs en regard des trois buts principaux ; ils sont néanmoins importants dans l'aménagement des pays ; il faut citer :

- * L'alimentation en eau potable ou industrielle.
- * La régularisation en vue de la navigation.
- * Les développements touristiques et de loisirs.
- * La recharge et l'assainissement des nappes phréatiques.

I-2-Différents types de barrages :

La forme de la vallée, la nature du sol, les matériaux à disposition sur le site déterminent le type de barrage. Les barrages sont construits en béton ou en maçonnerie; les digues (ou barrages en remblai) sont en terre ou en enrochement.

I-2-1-Les barrages en matériaux meubles :

Les barrages en terre font partie des premiers ouvrages d'art réalisés par l'homme. Le développement des engins de terrassement et de compactage et une meilleure connaissance de la mécanique des sols permettent de réaliser de nos jours des ouvrages importants (jusqu'à 100 m de hauteur ou 10 millions de m³ de remblais) dans des conditions économiques intéressantes.

Leur profil est très variable et dépend essentiellement de la nature et des propriétés des matériaux disponibles au voisinage du site. On distingue le barrage homogène, constitué pour l'essentiel d'une seule sorte de terre compactée aussi imperméable que possible, et le barrage à zones, fait de plusieurs sortes de terre de perméabilités différentes.

Chapitre I : généralités sur les barrages

Les barrages en terre sont très sensibles à l'érosion par l'eau. Certaines précautions sont donc à prendre préventivement comme la surélévation de la crête théorique du barrage pour compenser le tassement des matériaux, la mise en œuvre de filtres et drains pour éviter les risques d'entraînement de terre dus à des circulations d'eau à l'intérieur du barrage, enfin l'adoucissement du talus amont pour parer à son instabilité lors des changements du niveau de retenue.

Les barrages en enrochements sont constitués d'éléments rocheux de toutes dimensions (« tout-venant » de carrière), l'étanchéité étant assurée par un organe souple placé soit sur le parement amont (masque réalisé en béton armé ou en produits noirs), soit dans le corps du barrage (écran constitué d'un noyau en terre « imperméable »).

La principale difficulté de ce type de barrage provient des tassements dus à l'écrasement et au dérapage des blocs entre eux. Survenant lors de la construction et se poursuivant après, ils peuvent mettre en péril l'organe souple d'étanchéité. Pour accélérer le tassement, les blocs constitutifs du barrage sont arrosés intensément afin de lubrifier leurs contacts.

I-2-2 Barrage-poids en béton :

La stabilité des barrage-poids sous l'effet de la poussée de l'eau est assurée par le poids du matériau. Ces ouvrages peuvent être en maçonnerie ou en béton, en maçonnerie hourdée à la chaux pour les plus anciens, en béton compacté au rouleau pour les plus récents. Ce type de barrage (figure 1.1) convient bien pour des vallées larges ayant une fondation rocheuse. Ils sont souvent découpés en plots à la construction, l'étanchéité entre plots étant assurée par un dispositif placé à l'amont des joints.

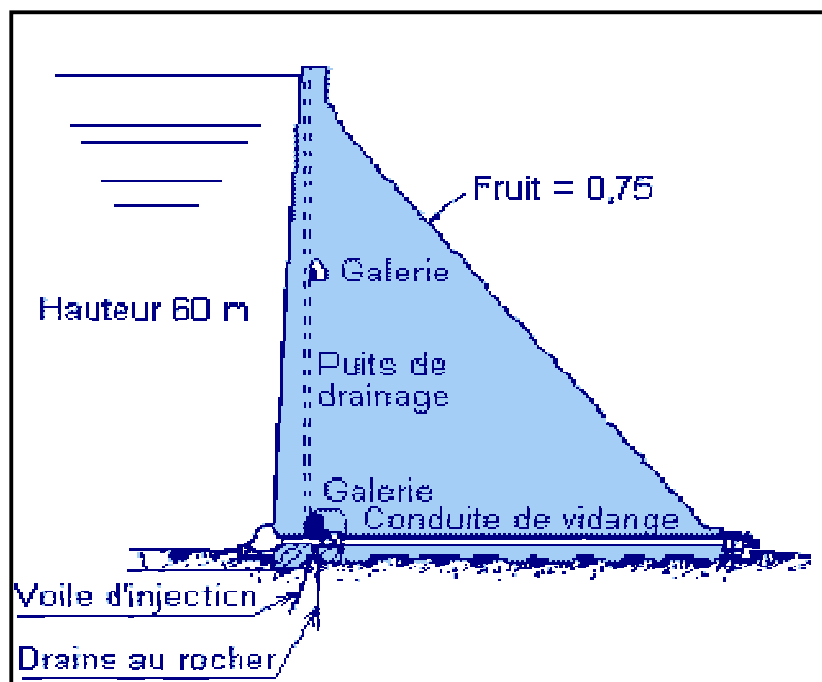


Figure I-1: Barrage poids.

Chapitre I : généralités sur les barrages

Les formes sont diverses, forme rectangulaire simple pour les plus petits, forme triangulaire de façon classique, formes audacieuses plus élancées dans la partie supérieure à la fois pour des raisons architecturales et de quantité de matériau mis en oeuvre. Au siècle dernier, les maîtres d'oeuvre ont cherché à économiser de la matière en raidissant progressivement les parements.

Ils ont donné une forme légèrement courbe au tracé en plan du barrage de manière à permettre les mouvements de la structure en évitant l'ouverture des joints, notamment en hiver.

Les ruptures successives du barrage de Bouzey ont amené les constructeurs à plus de prudence en mettant en évidence le rôle joué par les sous-pressions tant dans les fondations que dans le corps du barrage. Les formes les plus fréquentes des barrage-poids modernes sont des profils triangulaires qui se redressent en partie supérieure pour supporter la route de couronnement (figure I-2). Le parement amont est souvent vertical ou avec un fruit très faible.



Figure I-2 :Barrage d'Argentat

On peut distinguer les barrages pour lesquels les fonctions poids et étanchéité sont assurées de manière conjointe, comme les barrages en maçonnerie "homogène" (bien que le parement amont soit souvent mieux appareillé et/ou recouvert d'un enduit), et ceux pour lesquels les deux fonctions sont parfaitement séparées : barrage-poids à masque amont du type Lévy, barrage-poids en béton compacté au rouleau (BCR) avec membrane d'étanchéité ou masque amont.

La stabilité des barrages-poids repose essentiellement sur leur fruit et, si nécessaire, sur l'efficacité du drainage qui met le massif poids à l'abri des sous-pressions. Leur inconvénient majeur est de ne pas utiliser pleinement les capacités du matériau constituant la partie résistante du barrage (maçonnerie ou béton) à supporter des efforts importants de compression. Il est donc

Chapitre I : généralités sur les barrages

venu rapidement à l'idée des projeteurs de supprimer du béton superflu en allégeant la structure, en créant des arcades ou des niches sur le parement aval, en réduisant la surface d'assise au sol.

Lorsque ces élégissements descendent jusqu'à la fondation, il en résulte une augmentation des contraintes appliquées au sol de fondation. Mais la réduction de la surface d'assise se traduit par un meilleur drainage de ce contact. Les sous-pressions dangereuses pour la stabilité de l'ouvrage sont alors limitées. Pour certains barrages en rivière, les vannes représentent une part importante du parement amont. La structure résistante est alors limitée au socle d'assise et aux contreforts entre vannes.



Figure I-3 : Barrage d'Argentat

I-2-3 Barrages-voûtes :

Les barrages-voûtes sont des barrages généralement en béton dont la forme courbe permet un report des efforts de poussée de l'eau sur les rives rocheuses de la vallée. L'utilisation de l'effet d'arc bien connu des constructeurs de cathédrales est plutôt récente dans le domaine des barrages (encore qu'on en trouve des applications dès le XIIIème siècle en Iran ainsi que, sous une forme plus rustique, par les Romains).

La réalisation d'une voûte est certainement la façon d'utiliser au mieux les capacités du béton à supporter les efforts de compression, de diminuer le volume du matériau à mettre en oeuvre. Les barrages-poids-voûtes sont des barrages-poids dont la forme nettement arquée rend possible la création d'un véritable effet voûte et donc un report des efforts sur les appuis latéraux.

Ce type de barrage convient bien lorsque la topographie permet de fermer la vallée par une forme arquée de longueur réduite sans pour autant avoir une qualité de rocher en fondation suffisante pour admettre des sollicitations ponctuelles fortes de type encastrement. Il s'agit en général de barrages construits dans la première moitié du XXème. Le parement amont est en

Chapitre I : généralités sur les barrages

général vertical de manière à simplifier les coffrages. Le parement aval est souvent incliné mais il peut se présenter sous forme de marches d'escalier superposées pour simplifier l'exécution.



Figure I-4 : Barrage de Luzège

Précédées par des voûtes d'une trentaine de mètres de haut dans les années 1920, les grandes voûtes minces ont fait leur apparition au milieu du XX^{ème} siècle. Grâce à des méthodes et des moyens de calculs plus puissants, les formes se sont allégées de manière à économiser de la matière et à faire travailler la structure au maximum de ses possibilités. Les arcs circulaires sont devenus paraboliques, elliptiques ou en spirales logarithmiques. Les parements à double courbure ont été généralisés.

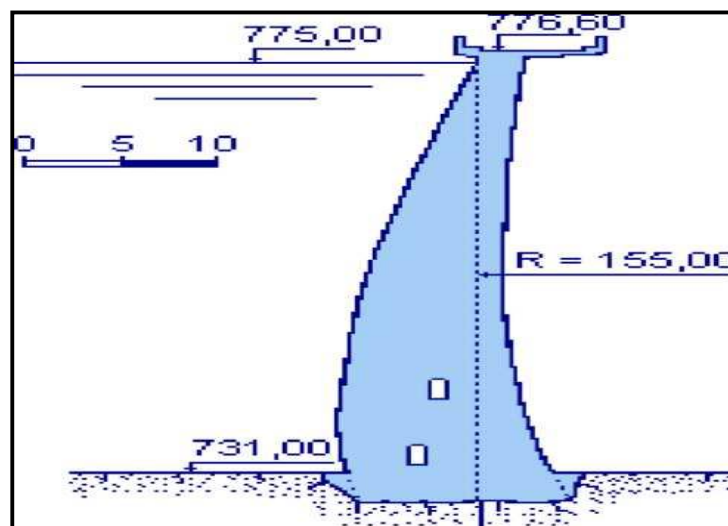


Figure I-5 : Coupe verticale d'un barrage voûte.

Chapitre I : généralités sur les barrages

Les projeteurs ont poursuivi dans cette direction jusqu'à connaître les premiers déboires : fissuration de grandes voûtes trop minces eu égard à leur fondation rocheuse très rigide, rupture de la voûte de Malpasset pour des raisons autres, géologiques notamment. Ils sont alors revenus à des formes moins allégées mais garantissant des coefficients de sécurité plus confortables.

Les barrages-voûtes sont construits par plots indépendants. Ceux-ci sont clavés en fin de construction de manière à rendre la voûte monolithique et à solliciter lors de la mise en eau à la fois les arcs et les consoles que sont les plots de construction. La stabilité de ces barrages dépend essentiellement de la capacité (de résistance, de rigidité) de leur fondation à supporter des efforts concentrés au droit des appuis, efforts liés à l'encastrement de la structure, à la poussée des arcs, mais aussi, pour les voûtes minces, aux fortes sollicitations hydrauliques dues à la finesse de la structure.

La présence de culées peut toutefois permettre un report plus aisé des efforts sur les rives.

I-2-4-Barrages a contreforts :

Un barrage à contreforts comprend :

Une série de murs parallèles, généralement de forme triangulaire, plus ou moins épais et plus ou moins espacés (les contreforts).

Une bouchure entre contreforts transmettant à ceux-ci la poussée de l'eau. La bouchure peut être constituée :

- * D'une dalle plane en béton.
- * D'un élargissement du contrefort vers l'amont.
- * D'une voûte de faible portée.

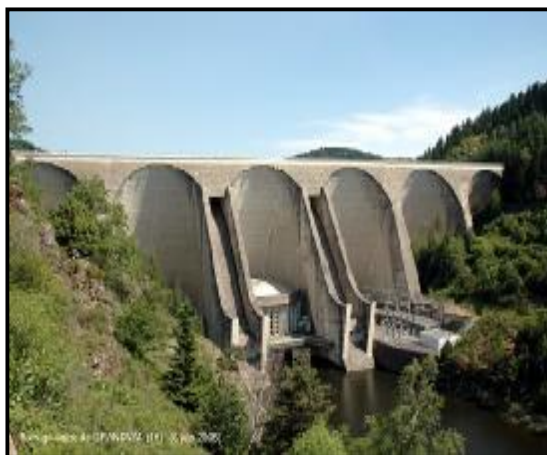


Figure I-6: Barrage de Grandval



Figure I-7 :Barrage de Faux-laMontagne

Chapitre I : généralités sur les barrages

Le nombre de contreforts peut varier de quelques unités pour les plus grands d'entre eux (barrage de Grandval ou de Calacuccia), à plusieurs dizaines comme sur les barrages de la Girotte, de Roselend et sur les barrages de type Considère (Vezins ou Rophémel).

Pour ces derniers, l'audace des constructeurs est allée jusqu'à réduire l'épaisseur des voûtelettes à quelques dizaines de centimètres, nécessitant le recours au béton armé. Cette épaisseur augmente un peu en partie basse mais demeure réduite à l'approche de la fondation. Les parements amont sont en général fortement inclinés de manière à transmettre directement au pied des contreforts et donc à la fondation rocheuse une partie de la poussée de l'eau sur le parement amont.

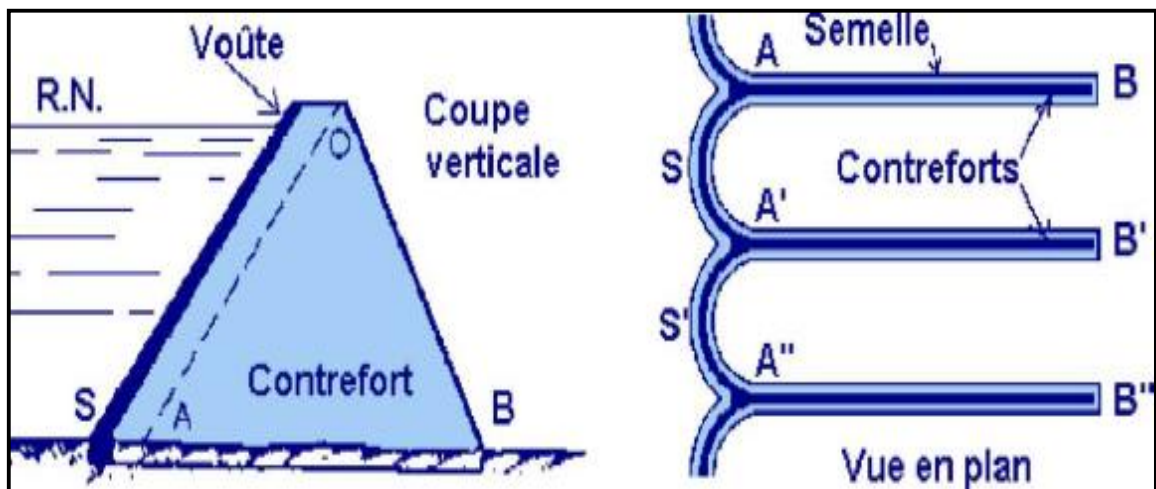


Figure I-8 : Barrage à contreforts.

Les barrages à contreforts sont bien adaptés aux vallées larges avec une fondation rocheuse de bonne qualité.

I-3-Conception et calcul des barrages en béton :

Ces barrages s'opposent à la force créée par la pression de l'eau soit par leur propre poids (barrages poids), soit en reportant sur les rives par un effet de voûte la poussée hydraulique (barrages voûte), soit encore en associant ces deux possibilités (barrages poids-voûte), soit enfin en reportant les efforts sur le sol par l'intermédiaire de contreforts. (Barrages contreforts).

- * Les barrages poids : Ils présentent l'avantage de ne solliciter que très peu la résistance des berges, par contre leur construction nécessite une grande quantité de béton, et une excellente qualité du sol d'assise.

I-3-1- Actions exercées sur un barrage poids :

C'est Maurice LEVY (1838 – 1910) ingénieur français qui, à la fin du XIX^e siècle, a mis en évidence l'importance des sous-pressions dans la stabilité des barrages poids. Les barrages

Chapitre I : généralités sur les barrages

poids modernes sont caractérisés par une section pratiquement triangulaire. La somme de leurs fruits amont et aval est comprise entre 0.70 et 0.80.

I-3-2- Les plus résistants aux sollicitations dynamiques sont :

- * barrages-voûtes et les barrages poids-voûtes, de part leur hyperstaticité.
- * Les barrages en enrochement à noyau central argileux, de part leur capacité à supporter de grandes déformations.

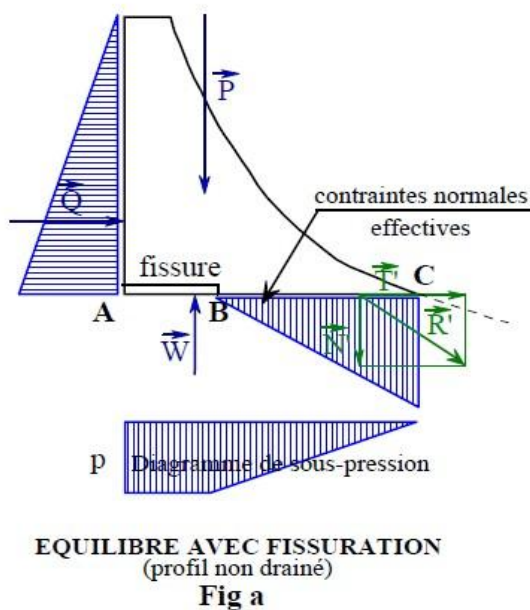


Figure I-9-a : Equilibre avec fissuration.

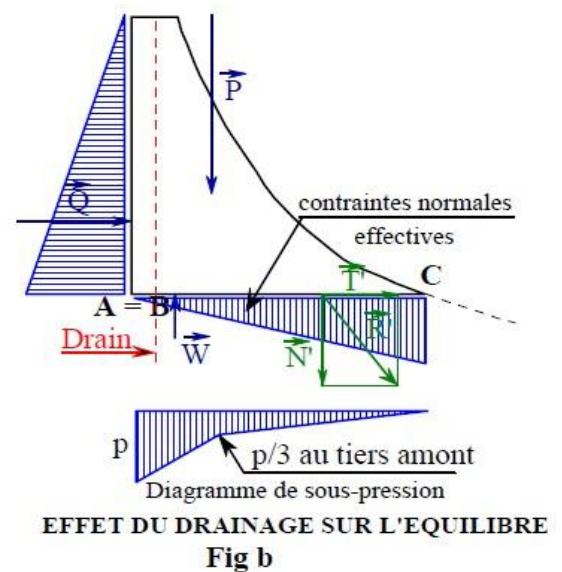


Figure 1-9-b : Effet du drainage sur l'équilibre.

Les actions exercées sur le barrage sont :

- * \vec{P} : Poids du barrage.
- * \vec{Q} : Poussée de l'eau.
- * \vec{W} : Résultante des pressions d'eau interstitielle (ascendante) sur la section ABC.
- * \vec{R} : Résultante des forces (cas étanche).
- * \vec{R}' : Résultante des forces (cas avec infiltration).
- * N : Composante normale de la résultante.
- * T : Composante tangentielle de la résultante.

$$\vec{R} = \vec{P} + \vec{Q} \quad (\text{I-1})$$

$$\vec{R}' = \vec{R} + \vec{Q} + \vec{W} \quad (\text{I-2})$$

Chapitre I : généralités sur les barrages

$$\text{Composantes de } R' \begin{cases} N' = N - W & (\text{composante normale}) \\ T' = T & (\text{composante tangentielle}) \end{cases} \quad \begin{matrix} (I-3) \\ (I-4) \end{matrix}$$

Les ouvrages du XIX^e siècle ont été dimensionnés en négligeant la sous-pression \vec{W} due à l'eau percolant dans le barrage ou dans sa fondation. On sous-estimait alors l'inclinaison de la résultante effective $\vec{R'}$ devant résister au cisaillement. On peut noter que toute apparition de fissure côté amont entraîne l'apparition de sous-pression (voir figure I-9-a).

On doit vérifier :

- * Que la contrainte totale au pied amont est au moins égale à la pression du réservoir.
- * Que la contrainte effective au pied amont est une compression.
- * La stabilité au glissement (rapport T/N).

a- Les barrages à contreforts :

Les contreforts en béton de forme triangulaire supportent en principe des voûtes de faible portée ou des dalles planes qui transmettent la poussée de l'eau vers le sol. Ces barrages nécessitent moins de béton (20 à 25 % de moins) que les barrages poids et n'exigent pas de vallée étroite comme les barrages voûtes. Il est néanmoins nécessaire que le rocher soit de bonne qualité. Dans de telles structures, le parement amont (dalles ou voûtes) doit être incliné de l'ordre de 0.3/1 (rapport de l'horizontale / la verticale) pour profiter de la composante verticale de la poussée de l'eau. Les coffrages sont plus complexes à réaliser. L'influence des variations thermiques sur les fondations est importante. On préfère donc à ce type de construction, les barrages en B.C.R.

b- Les barrages poids évidés :

Ce sont des barrages où l'on a créé des vides, par coffrage, dans leur partie interne. Il est paradoxal de vouloir alléger un barrage poids, mais le gain de poids est largement compensé par la diminution des sous-pressions grâce à un drainage intense réalisé à partir de ces cavités. Il existe très peu de constructions de ce type en Europe.

c- Les barrages voûtes :

Ils sont constitués par une coque en béton à simple ou double courbure. Ce type de barrage est implanté dans une vallée présentant une zone relativement étroite (verrou) pour permettre l'arc-boutement de l'ouvrage sur les rives qui doivent être géologiquement très saines.

La courbure de la voûte permet de reporter les efforts de pression sur les appuis de rive, tout en conservant une paroi comprimée. Une première approche, très grossière, de dimensionnement consiste à considérer une superposition d'arcs supposés indépendants. La contrainte dans le béton est généralement de l'ordre de 5 MPa afin de limiter les problèmes de déformations aux ancrages.

Chapitre I : généralités sur les barrages

La valeur de la contrainte est alors déduite de la formule du tube et vaut :

$$\sigma = \frac{p(z).R}{e}$$

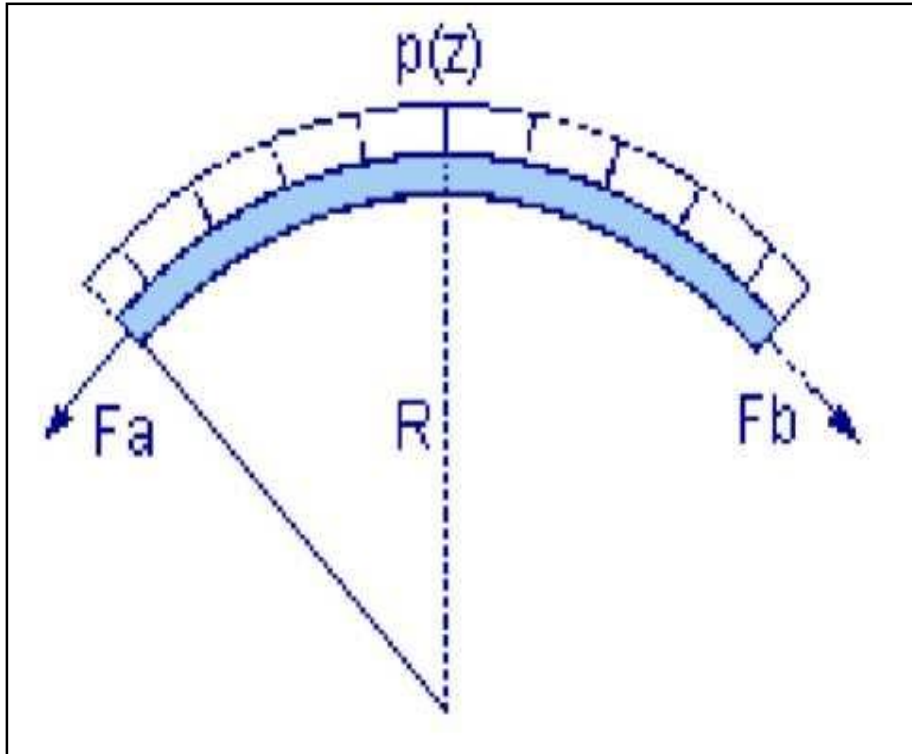


Figure I-10 : diagramme d'un barrage voûte.

σ (MPa) : contrainte moyenne dans un arc.

$P(z)$ (MPa) : pression de l'eau à la cote z .

$R(m)$: rayon amont de la voûte.

$E(m)$: épaisseur de la voûte.

Dans la réalité, les arcs ne sont pas indépendants; de plus le barrage est partiellement encastré en pied, ce qui conduit à adopter d'autres modèles de calculs par un double découpage de la voûte en poutres courbes horizontales (arcs) et en poutres verticales (consoles).

Les efforts appliqués à chaque noeud se répartissant entre ces deux familles de poutres et les déplacements des arcs et des consoles sont égaux à leur intersection. Actuellement, une des méthodes numériques utilisées est le calcul par éléments finis.

Chapitre I : généralités sur les barrages

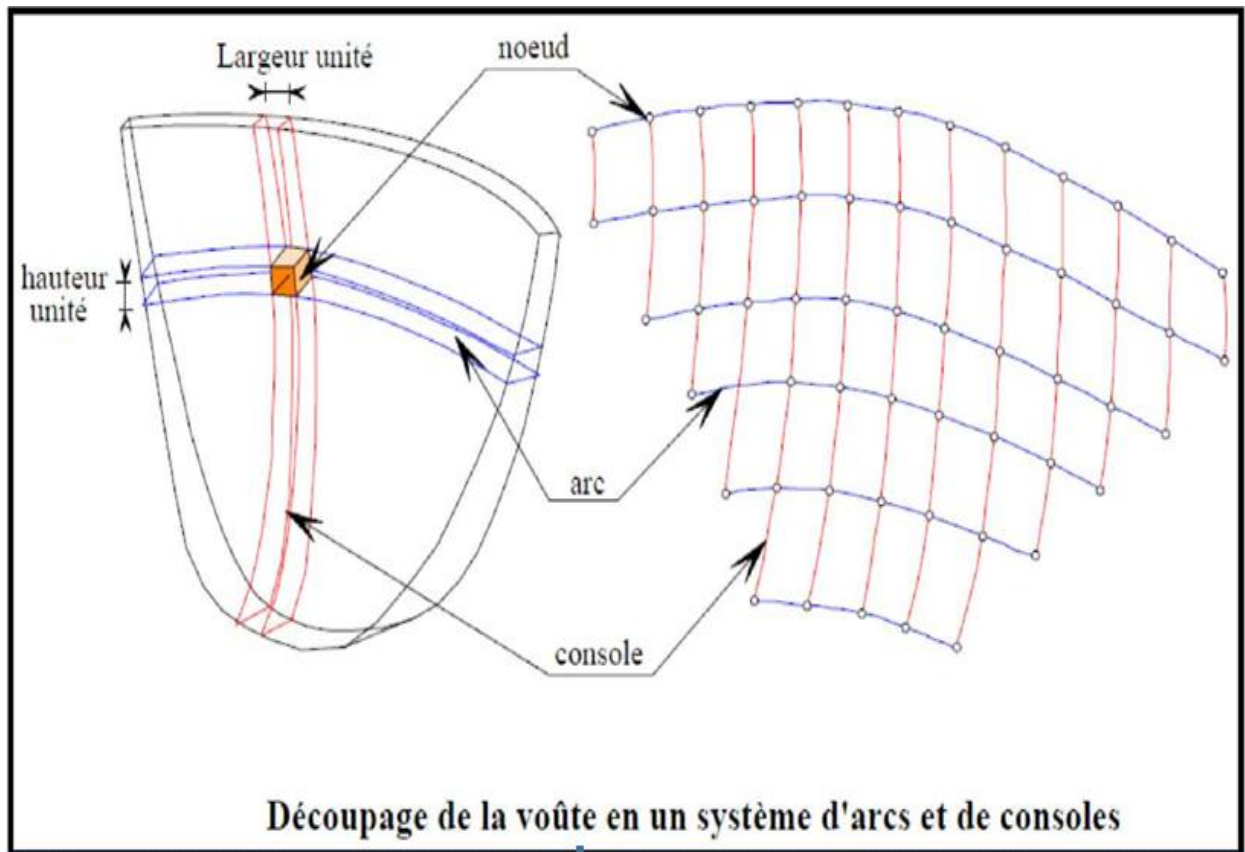


Figure I-11 : Modèle de modélisation en éléments finis.

I-4- Conclusion :

Ce chapitre est une présentation des différents types de barrages existant et une approche de calcul de la conception des barrages en béton. Dans le cadre du présent travail notre étude se limite à un seul cas à savoir l'étude du comportement d'un barrage poids en béton et son assise (c.à.d. l'interaction entre la structure et sa fondation). Cette notion sera présentée en détail dans le chapitre suivant.